

## Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP-Brasil

Eldo Silva dos Santos<sup>1</sup> e Alan Cavalcanti da Cunha<sup>2</sup>

1. Engenheiro Químico, Universidade Estadual de Campinas. Doutorando em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá. Professor, Universidade Federal do Amapá, Brasil. E-mail: santos\_eldo@yahoo.com  
2. Engenheiro Químico, Universidade Federal do Pará. Doutor em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. Professor, Universidade Federal do Amapá, Brasil. E-mail: alanacunha@unifap.br

**RESUMO:** Durante a construção de barragens ocorrem problemas na dinâmica hidrossedimentométrica e no nível de assoreamento que devem ser considerados porque afetam diretamente a vida útil do reservatório. Este estudo avaliou três cenários hidrossedimentométricos na Bacia do Rio Araguari sob impacto do futuro reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Cachoeira Caldeirão. O cenário 1 considerou a manutenção das condições atuais do uso e ocupação do solo, com uma baixa carga de sedimentos ( $2,01.10^8$  kg/ano). O cenário 2 considerou aumento de 0,7% para 3% ao ano na taxa de produção de hidrossedimentos. E no cenário 3, a descarga sólida foi aumentada em 30 vezes em relação ao primeiro cenário. Os cenários foram analisados a partir da visão estratégica da dinâmica do uso e ocupação do solo na bacia (IEPA/ZEE, 2008). Os modelos de Borland e Miller foram utilizados para avaliar o nível de assoreamento e o de Lara e Pemberton para calcular o peso específico aparente das cargas ( $\gamma_{ap}$ ). O cenário 1 indicou a manutenção das condições atuais de conservação da bacia, com baixo nível de assoreamento do reservatório nos próximos 200 anos. No cenário 2 as alterações tornaram-se relevantes a partir dos próximos 100 anos. No cenário 3 a deterioração do nível útil do reservatório começa a ocorrer em 50 anos, com perda de 67% do seu volume útil inicial. Concluiu-se que a futura dinâmica hidrossedimentométrica dependerá dos serviços ambientais prestados pelas áreas de conservação e do entorno a montante da UHE Cachoeira Caldeirão para garantir a atual qualidade hidrossedimentométrica na bacia.

**Palavras-chave:** bacia hidrográfica, sedimentação, modelagem ambiental, vulnerabilidade.

### Hydrosedimentometric scenarios for estimating sedimentation rates and useful lifetime of Cachoeira Caldeirão reservoir in Rio Araguari/AP-Brazil

**ABSTRACT:** During the construction of dams problems in the dynamic hydrosedimentometric and storage level should be considered, because it directly affects the useful life of the reservoir. This study evaluated three hydrosedimentometric scenarios in the Basin of Araguari River under impact of future reservoir Hydroelectric Plant Cachoeira Caldeirão (UHECC). Scenario 1 considered the maintenance of the present conditions of use and occupation of the watershed, with a low sediment load ( $2,01.10^8$  kg / year). Scenario 2 considered an increase of 0.7% to 3% per year in hydrosedimentometric production rate. And in the third scenario, the solid discharge was increased by 30 times compared to the first one. The three scenarios were analyzed from the strategic vision of the dynamics of the use and occupation of land in the basin (IEPA/ZEE, 2008). The Borland and Miller equations were used to assess the level of sedimentation and Lara and Pemberton to calculate the apparent specific gravity of the loads ( $\gamma_{ap}$ ). Scenario 1 indicated the maintenance of the current conditions of conservation of the basin, low level of sedimentation of the reservoir in the next 200 years. In scenario 2 the changes become relevant from the next 100 years. In scenario 3 the deterioration of the useful level of the reservoir begins to occur in just 50 years, with a loss of 67% of its initial volume. We concluded that future hydrosedimentometric dynamics will depend on the environmental services provided by conservation areas and surrounding upstream UHECC to ensure the current hydrosedimentometric quality in the basin.

**Keywords:** watershed, sedimentation, environmental modeling, vulnerability.

### 1. Introdução

Segundo ANEEL (2015), o Brasil tem nos rios sua principal fonte de geração de energia elétrica, com 62% proveniente de usinas hidrelétricas (UHEs). Na visão dos planejadores oficiais essa é uma vantagem comparativa que deve ser aprofundada (ISA, 2015).

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007), que tem como missão orientar os investimentos públicos e privados na área, nesse horizonte de tempo, as hidrelétricas continuarão a ser a tônica da expansão do setor. Segundo as estimativas, estas representarão 67,5% (ou 88,2 GW) do total de 130,8 GW que se pretende instalar no país entre 2005 e 2030, e considerando todas as demais fontes (térmicas a gás e carvão, nucleares, eólicas, biomassa, solar, etc). Para esse período, as UHEs contribuirão com cerca de 74% da eletricidade gerada no

país, patamar próximo ao atual.

Há uma demanda energética crescente no Brasil ocorrendo na Região Norte, em particular, e tem levado o interesse por projetos e construções de usinas hidrelétricas no país em vistas das demandas econômicas de crescimento atuais e futuras. Mas, atualmente, apenas 30% do potencial hidráulico brasileiro é aproveitado (ANEEL, 2008) e 90% da energia elétrica consumida no país vem de hidrelétricas (Carvalho, 2008). Tal fato insere o país em vantagem mundial em face de uma matriz energética baseada em fonte de energia renovável, barata e limpa, quando comparada com outras fontes alternativas. Segundo dados da ANEEL/PSE Consultoria /ABRACE (2009), o custo de geração de energia hídrica é de R\$ 116/MWh, enquanto o valor para usinas eólicas é de R\$ 232/MWh e usinas a diesel, R\$ 602/MWh.

No Estado do Amapá, a capacidade energética a ser instalada será de 880,09 MW dos quais 80%, ou 702MW, já são gerados a partir das Usinas Hidrelétricas Coaracy Nunes (UHECN), Ferreira Gomes (UHEFG) e, futuramente, Santo Antônio do Jari (UHESAJ) (ANEEL, 2015b). Atualmente, no Rio Araguari há 3 UHEs. Duas já estão em operação (UHECN, 78 MW de potência instalada, em operação desde 30 de dezembro de 1975), e a UHEFG, 10 km a **jusante** da UHECN, com 252 MW, em operação desde 04 de novembro de 2014), e a UHE Cachoeira Caldeirão (UHECC, 219 MW, 10 km a **montante** da UHECN) encontra-se em fase de construção (ANEEL, 2015). A UHECC será o foco do presente trabalho. Sua potência média será de cerca de 170 MW e seu lago ocupará uma área próxima de 55 km<sup>2</sup>, o maior do estado em termos absolutos, quando comparada aos empreendimentos atuais como UHECN e UHEFG.

Como comentado anteriormente, o aproveitamento hidrelétrico tem vantagens importantes em relação às outras fontes energéticas, mas seus impactos ambientais não podem ser desprezados e têm sido tema de inúmeros estudos científicos (PETTS, 1984; JUNK e MELLO, 1987; WCD, 2000; VÖRÖSMARTY, 2003; PHILLIPS et al., 2004; DAI et al., 2008).

No projeto de implantação e operação de uma usina hidrelétrica, um importante parâmetro de avaliação de sua viabilidade econômica e ambiental é a vida útil do reservatório. Isto é, apresenta importância tanto econômica (geração) quanto de conservação (usos múltiplos do reservatório). E um dos principais impactos é a redução da correnteza devido ao reservatório (CUNHA et al., 2013), que resulta em maior tendência à deposição de sedimentos no mesmo, o que é previsto em projeto. Este é denominado "volume morto" do reservatório e é destinado para este fim específico.

A carga sedimentar relativamente baixa de rios de água clara e água preta garante aos reservatórios hidrelétricos amazônicos, teoricamente, uma vida útil de centenas de anos. Segundo Junk e Mello (1987), deve-se salientar que estas classes de águas de rios apresentam concentração relativamente pobre de sedimentos por causa da existência de uma floresta densa e praticamente contínua cobrindo as bacias hidrográficas e protegendo os solos contra a força erosiva de mais de 2.000mm/ano de precipitação. Na bacia do Rio Araguari, foco da pesquisa, esta precipitação é em média 13% maior (2.300 mm/ano) (CUNHA et al., 2014), tornando esta bacia ainda mais vulnerável a processos hidrossedimentométricos, como os causados por desflorestamento, por exemplo.

Neste contexto, segundo Alix-Garcia e Wolff (2014), durante a primeira década deste século, a perda total de florestas no Globo totalizou mais do que 5 milhões de hectares por ano, com 13 milhões de hectares completamente destruídos somente com base nos primeiros anos. Isto corresponde ao desaparecimento de 1,5 campos de futebol de floresta a cada dois segundos, ou o equivalente à área da Costa Rica anualmente. Além do problema da emissão do carbono, causado pelo desmatamento, as florestas também fornecem muitos benefícios ambientais locais tais como o controle de erosão e a manutenção das funções ecológicas da bacia hidrográfica, dentro da qual as florestas tropicais abrigam uma

megabiodiversidade que pode beneficiar futuramente toda a sociedade no longo prazo.

Para ilustrar estes benefícios, Nguyena et al., (2013) estimaram um valor econômico dos serviços hidrológicos da floresta para a Usina Hidrelétrica de Hoa Binh no Vietnam, sendo a maior usina que supre a energia da capital Hanói. E, com base em medidas de 2001 a 2006, em 240 parcelas permanentes de amostragem em diferentes tipos de vegetação distribuídas através da bacia hidrográfica para produção de eletricidade, pode variar entre US\$ 26,3 à 85,5 milhões por ano. Além disso, concluíram que a longevidade do reservatório poderia se prolongar por aproximadamente 35 a 80 anos, dependendo do estado da cobertura da floresta na bacia hidrográfica.

Nesse sentido, a bacia do Rio Araguari é de grande importância para a biodiversidade do Estado do Amapá porque abriga tanto empreendimentos hidrelétricos quanto extensas unidades de conservação (UCs). Em seu curso estão localizados o Parque Nacional das Montanhas do Tumucumaque, a Floresta Nacional (FLONA), a Floresta Estadual do Amapá e, no Baixo Araguari, a Reserva Biológica do Lago Piratuba (REBIO)(BRITO, 2008; ECOTUMUCUMAQUE, 2010; SANTOS, 2012).

Exatamente esta proteção a que se refere Junk e Mello (1987) pode ser eliminada em grande escala pela capacidade de atração de outros empreendimentos, tais como projetos de mineração, industriais, florestais e agropecuários, além da expansão urbana, a serem implantados em consequência da disponibilidade da energia hidrelétrica. Assim, a tendência dos processos erosivos na bacia é aumentar progressivamente, de 10 a 100 vezes, tal como mostrado em estudos realizados nos EUA (WAHRHAFTIG e CURRY, 1967 *apud* JUNK e MELLO, 1987).

A explicação para estes problemas é que, após a construção do reservatório, o curso d'água sofre em sua seção transversal um aumento da área alagada, o que resulta em menores velocidades da água (CUNHA et al., 2013) causando a deposição da carga sólida da corrente afluyente porque as forças longitudinais das correntes são superadas pelas forças gravitacionais das partículas mais pesadas (com maior peso específico). As partículas de maior diâmetro são as primeiras a se depositar ao longo do canal da represa enquanto as menores se deslocam em direção a barragem.

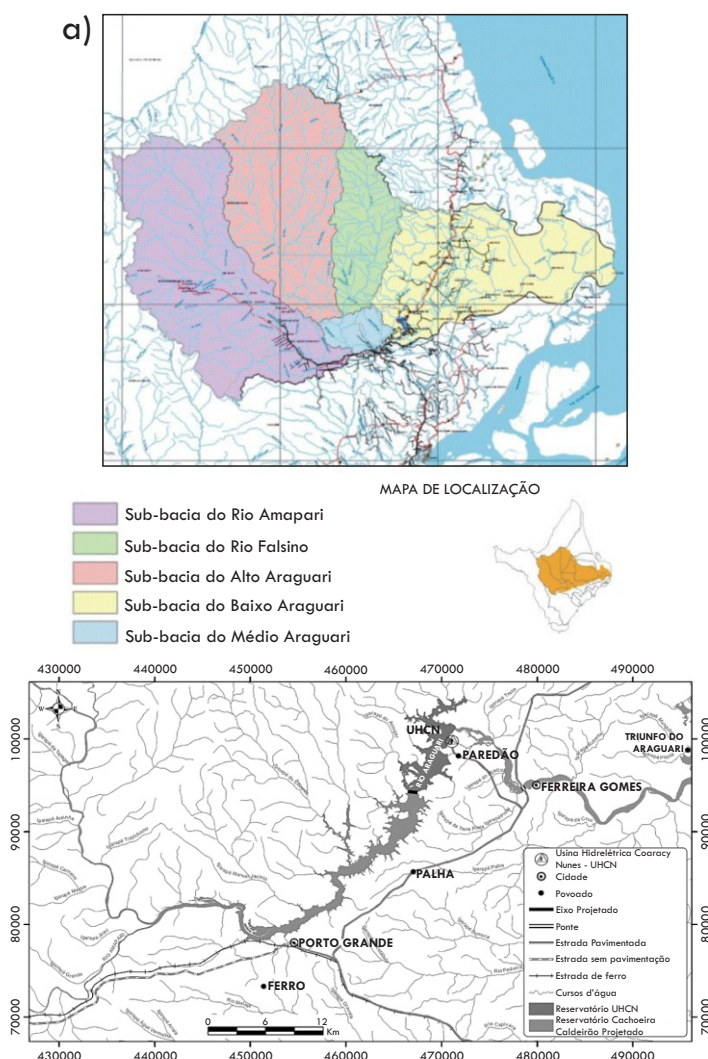
Segundo Carvalho (2008), os barramentos constituem impedimentos para a passagem da maior parte dos sólidos suspensos na água para jusante. Mas com o potencial aumento do assoreamento ao longo do tempo, algumas consequências podem ser observadas como inundações em áreas a montante do reservatório e redução da seção e consequente aumento da velocidade que tendem a transportar maior quantidade de sedimentos para jusante da represa, depositando-se principalmente na região do volume morto do reservatório, reduzindo a vida útil do mesmo.

O presente estudo de caso avaliou, com auxílio dos softwares SEDIMENT<sup>®</sup> e DPOSIT<sup>®</sup> (CARVALHO, 2008), cenários de potenciais impactos a partir de três diferentes condições de uso e ocupação da bacia, elaborando-se cenários ambientais da dinâmica hidrossedimentométrica do futuro

reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão. Os horizontes temporais foram definidos entre os próximos 50 e 200 anos. Os três cenários propostos são: (a) descarga sólida afluyente mantendo níveis atuais (ECOTUMUCUMAQUE, 2010; ZEE, 2008), partindo da concentração média de 6,9 mg/L (BRITO, 2008; BÁRBARA et al., 2010), e com crescimento da carga sólida ao longo dos próximos 50 anos de 0,7% ao ano; (b) aumento da descarga sólida com aumento de 3% ao ano nos próximos 50 anos; e (c) crescimento na ordem de 10 vezes a aflüência de sólidos atual, num cenário de grandes alterações no uso e ocupação do solo a montante do aproveitamento hidrelétrico.

#### Área de Estudo

A bacia do rio Araguari tem cerca de 41.900 km<sup>2</sup> (SEMA, 2004) e é a maior Estado do Amapá, localizada a 90 km ao norte da cidade de Macapá, em linha reta. O rio Araguari tem aproximadamente 617 km de extensão e deságua no Oceano Atlântico, ligeiramente ao norte da foz do rio Amazonas (ECOTUMUCUMAQUE, 2010) (Figura 1).



**Figura 1.** a) Bacia do Rio Araguari e b) área diretamente afetada pela futura UHE Cachoeira Caldeirão. Fonte: Ecotumucumaque (2010).

O regime hidrológico do rio Araguari apresenta vazões médias da série histórica (40 anos), próximas de 1.000m<sup>3</sup>/s, entre os meses de janeiro a setembro. Nos 3 últimos meses do ano, as vazões diminuem e a capacidade de geração de

energia se reduz com médias mínimas da série histórica de vazões próximas de 300m<sup>3</sup>/s ou menores. Diante deste quadro, desde 1982, a Eletronorte diagnosticou a necessidade de um reservatório para regular a vazão afluyente a esta hidrelétrica (ELETRONORTE, 1999; CUNHA et al., 2010).

O futuro aproveitamento hidrelétrico (AHE) da Usina UHECC, cuja barragem está distante 245 km da foz, está em fase de instalação. Sua capacidade estimada será de 170MW e estará localizada a montante da UHECN (236 km distante da foz). Uma das finalidades do reservatório, além da geração de energia, é servir como reguladora da vazão afluyente a UHECN e UHEFG. A área de drenagem onde se encontrará a UHECC tem aproximadamente 30.510km<sup>2</sup> (BABÁ, 2010).

## 2. Material e Métodos

### Modelagem e Modelo Conceitual

Para estimar o impacto no assoreamento do reservatório da UHECC, foram utilizados os softwares SEDIMENT<sup>®</sup> e DPOSIT<sup>®</sup>, desenvolvidos por Braga (S/D), que utiliza metodologias desenvolvidas por Borland e Miller (1960), como modelo para a avaliação do assoreamento de reservatório, por Lara e Pemberton (1965 *apud* STRAND, 1987).

No cálculo do peso específico aparente dos depósitos em reservatórios ( $\gamma_{apr}$ ) foram utilizadas as curvas de Brune e Churchill para determinar a eficiência de retenção de sedimentos (CARVALHO, 2008; CARVALHO, 2000; BRAGA, S/D). O software acrescentou às metodologias já desenvolvidas a dinâmica de evolução/regressão da produção de sedimentos com o tempo. Isso foi feito ao se adicionar uma taxa de crescimento dessa produção, tal como no cálculo de juros compostos, de acordo com a equação 1.

$$Q_{sól(t)} = Q_{sól(t_0)} \cdot (1 + taxa)^t \quad (1)$$

Onde  $Q_{sól(t)}$  é a descarga sólida no tempo  $t$ ,  $Q_{sól(t_0)}$  é descarga sólida inicial e a “taxa” é a taxa de crescimento da concentração de sedimentos suspensos no tempo.

Dessa forma, foram estimados os impactos nas alterações do uso do solo ao longo do tempo, bem como os volumes de sedimentos carregados para o corpo hídrico com a construção da futura barragem e estimativas granulométricas básicas de Cunha (2010).

### Método de Borland e Miller (1960 *apud* CARVALHO, 2008)

Também conhecido como “método empírico de redução de área”, esse método foi desenvolvido a partir de levantamentos sistemáticos de 30 reservatórios pelo U.S. Bureau of Reclamation e outras entidades dos EUA. Baseia-se na relação, estabelecida pelos seus autores, entre a forma do reservatório e a fração de sedimentos depositados ao longo do leito e em diversos níveis do reservatório (CARVALHO, 2008). O método reconhece que a distribuição de sedimentos depende de quatro fatores: 1) modo como o reservatório é operado; 2) o tamanho e a textura da partícula de sedimento depositada; 3) a geometria do reservatório e 4) o volume de sedimentos depositados no reservatório.



Entre esses fatores, os autores consideraram a geometria do reservatório como o critério mais significativo para a construção de curvas de projeto para se determinar a distribuição de sedimentos. Assim, a classificação do tipo de reservatório utilizado no método é mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Valor de  $m$ , classificando o tipo de reservatório no modelo Borland e Miller.

Tipo de reservatório	$m$	Classificação
I	3,5 a 4,5	De zonas planas
II	2,5 a 3,5	De zonas de inundação a colinas
III	1,5 a 2,5	Montanhoso
IV	1,0 a 1,5	De gargantas profundas

O valor de  $m$  apresentado na tabela 1 é o coeficiente angular do gráfico  $\log$  (profundidade) x  $\log$  (volume) do reservatório.

A equação básica do método (CARVALHO, 2008) é:

$$S = \int_0^{y_0} A \cdot dy + \int_{y_0}^H K \cdot a \cdot dy \quad (2)$$

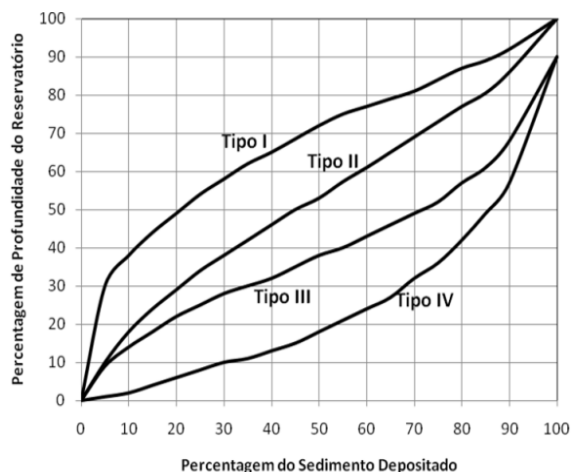
Onde:  $S$  é o deflúvio sólido total a ser depositado no reservatório,  $O$  é a altitude zero original da barragem,  $y_0$  é a altitude zero na barragem depois do período considerado com fluxo de sedimentos,  $A$  é a área da superfície do reservatório,  $dy$  é o incremento de profundidade,  $H$  é a profundidade total do reservatório no nível da água (NA) normal,  $K$  é a constante de proporcionalidade para conversão de áreas relativas de sedimento em áreas reais para um reservatório e  $a$  é a área relativa de sedimento.

Após integração e simplificação da equação (2), temos:

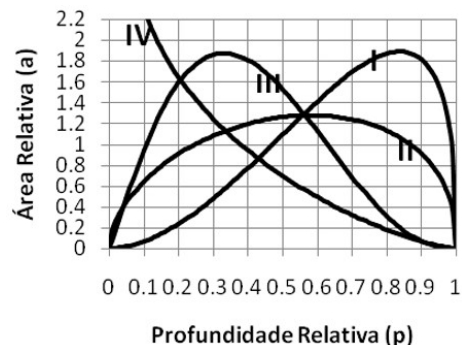
$$\frac{1 - v_0}{a_0} = \frac{S - V_0}{H - A_0} \quad (3)$$

Onde  $v_0$  é o volume relativo do reservatório na nova profundidade zero,  $a_0$  é a área relativa do reservatório na nova profundidade zero,  $V_0$  é o volume total do reservatório na nova profundidade zero,  $H$  é a profundidade original do reservatório e  $A_0$  é a área total do reservatório na nova profundidade zero.

As curvas de “enchimento” mostradas na Figura 2 dão origem às curvas de projeto mostradas na Figura 3, que servirão, respectivamente, para o cálculo da altura de depósito no pé da barragem e para a avaliação da distribuição de sedimentos ao longo do reservatório e a diversas alturas.



**Figura 2.** Curvas de percentagem de profundidade x percentagem de volume de sedimentos, segundo Borland e Miller (1960).



**Figura 3.** Curvas da profundidade relativa x área relativa para avaliação da distribuição de sedimento em reservatório (BORLAND e MILLER, 1960 *apud* CARVALHO, 2008).

#### Cálculo do peso específico aparente ( $\gamma_{ap}$ )

O peso específico aparente ( $\gamma_{ap}$ ) de depósitos de reservatórios é importante porque a carga sólida é medida em massa por tempo e o grau de assoreamento é dado em volume do material depositado em relação ao volume do reservatório. Assim, o conhecimento de  $\gamma_{ap}$  permite empregar a relação entre massa e volume.  $\gamma_{ap}$  varia com o tempo devido à compactação do sedimento pela água e pelo próprio sedimento nos níveis superiores (CARVALHO, 2008).

Lara e Pemberton (1965 *apud* STRAND, 1987) concluíram a partir de 1300 amostras de sedimentos analisadas estatisticamente que os fatores que influem significativamente no cálculo do  $\gamma_{ap}$  são: a maneira como o reservatório é operado; a textura e a granulometria das partículas e a composição e o grau de consolidação dos depósitos.

A partir dessas análises, são utilizadas equações matemáticas para avaliar a variação do  $\gamma_{ap}$  com o tempo e o tipo de operação do reservatório. Os reservatórios foram classificados de acordo com seu tipo de operação, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2.** Tipo de operação do reservatório.

Tipo de operação	Classificação
1	Sedimento sempre ou quase sempre submerso
2	Depleção do reservatório de pequena a média
3	Reservatório com consideráveis variações de nível
4	Reservatórios normalmente vazios

Uma vez escolhido o tipo de operação do reservatório o  $\gamma_{ap}$  pode ser calculado pela equação:

$$\gamma_{ap} = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s \quad (4)$$

Onde  $\gamma_{ap}$  é o peso específico aparente;  $W_c$ ,  $W_m$  e  $W_s$  são os pesos específicos de argila, silte e areia, respectivamente, obtidos segundo o tipo de operação do reservatório (Tabela 3);  $p_c$ ,  $p_m$  e  $p_s$  são as frações de argila, silte e areia, respectivamente, no sedimento afluente.

**Tabela 3.** Constante  $W$  para cálculo do peso específico aparente em função do tipo de operação do reservatório (STRAND, 1987).

Tipo de operação	$W_c$	$W_m$	$W_s$
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Ao longo dos anos, o nível de compactação do sedimento depositado varia e o peso aparente específico,  $\gamma_{ap}$ , também se altera. Miller (1953 *apud* STRAND, 1987) desenvolveu uma equação empírica para calcular o novo peso específico aparente no tempo  $t$ :

$$\gamma_t = \gamma_i + 0,4343 \cdot K \left[ \frac{t}{t-1} \cdot \ln(t) - 1 \right] \quad (5)$$

$$K = K_c \cdot p_c + K_m \cdot p_m + K_s \cdot p_s \quad (6)$$

Onde  $\gamma_i$  é o peso específico aparente no tempo  $t$ ;  $\gamma_i$  é peso específico aparente inicial;  $K$  é uma constante que depende da granulometria, baseada no tipo de operação do reservatório (Tabela 4).

**Tabela 4.** Constante  $K$  para o cálculo do  $\gamma_{ap}$  em função do tipo de operação do reservatório (CARVALHO, 2008).

Tipo de operação	$K_c$	$K_m$	$K_s$
1	0,2563	0,0913	0,0
2	0,1346	0,0288	0,0
3	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0

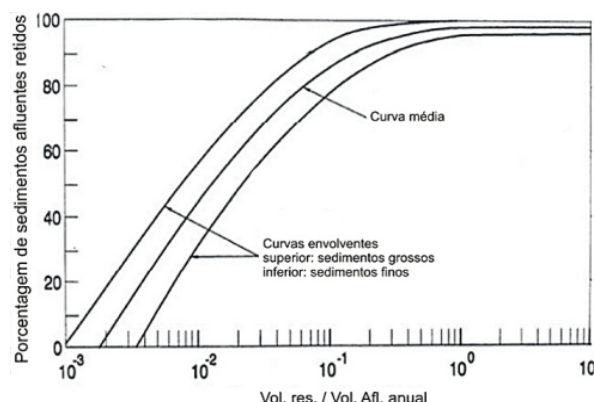
#### Determinação da eficiência de retenção.

A eficiência de retenção ( $E_R$ ) é a razão entre a massa de sedimentos depositados e a massa de sedimentos no fluxo afluente ao reservatório em determinado período de tempo (carga vertida ou que aflui pelas turbinas). Seu valor depende da velocidade de queda das partículas e da dinâmica do escoamento através do reservatório e, conforme descrita em Carvalho (2008), é calculada ano a ano pelo software SEDIMENT<sup>®</sup>. Sua estimativa é feita de forma iterativa uma vez que seu valor depende do volume de sólidos depositados, que é a variável que o SEDIMENT<sup>®</sup> se propõe a determinar (BRAGA, S/D).

Churchill (1948) e Brune (1953) desenvolveram modelos empíricos para determinar a eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios. Seus modelos foram baseados em dados obtidos em represas nos EUA e têm sido usados amplamente e com estimativas razoáveis para o cálculo da eficiência de retenção. Eles não consideram a granulometria da corrente afluente nem a composição da corrente que sai do reservatório.

Nesta investigação, optou-se pelo método de Brune, pois é o que exige menos dados de entrada, considerando que praticamente não há séries hidrossedimentométricas disponíveis para este tipo de análise no rio Araguari, com exceção dos dados de Ecotumucumaque (2009). Uma vez que tanto o modelo de Brune quanto o de Churchill têm boas respostas para o cálculo da retenção de sedimentos, foi utilizado o primeiro por ser o mais simples, além de ser o mais utilizado no Brasil, tanto para os médios quanto para grandes reservatórios (CARVALHO, 2008).

A Figura 4 apresenta as curvas de eficiência de Brune. As envoltórias da curva média dizem respeito aos depósitos contendo sedimentos finos (curva inferior) e grossos (curva superior).



**Figura 4.** Curvas de eficiência de retenção, segundo Brune (1953). Adaptado de Morris e Fan (2010).

No trecho do Rio Araguari onde está sendo construída a represa da UHECC, a corrente afluente atual é composta de 97% de areia, 2% de silte e 1% de argila (CUNHA, 2010). Desta forma, utilizou-se a curva superior para a determinação da eficiência de retenção da represa.

#### Dados de entrada dos softwares SEDIMENT<sup>®</sup> e DPOSIT<sup>®</sup>

Os dados utilizados na análise hidrossedimentométrica foram obtidos de várias fontes, como indicado pela Tabela 5, apresentando os parâmetros iniciais utilizados nas simulações.

**Tabela 5.** Parâmetros iniciais usados nos softwares SEDIMENT<sup>®</sup> e DPOSIT<sup>®</sup>.

Parâmetros	Valor	Fonte
Volume do reservatório no N.A. máximo normal (hm <sup>3</sup> )	331,44	(BABÁ, 2010)
Descarga líquida média anual afluente (m <sup>3</sup> /s)	960	(CUNHA et al., 2010) e ECOTUMUCUMAQUE (2010)
Descarga sólida média anual afluente (t/ano)	210.000	(BÁRBARA et al., 2010 e BRITO, 2008) – estimativa
Granulometria do sedimento afluente	Argila – 1% Silte – 2% Areia – 97%	(CUNHA, 2010)
Curva COTA x ÁREA x VOLUME	-	(BABÁ, 2010)

De acordo com Walling e Fang (2003) é aceitável a estimativa de que a carga de sedimentos suspensos equivale a 90% do fluxo total de sedimentos. Brito (2008) analisou, entre outros parâmetros, sólidos suspensos ao longo do Rio Araguari, inclusive em uma seção logo a montante da futura barragem da UHECC. Além disso, coletou amostras trimestrais da qualidade da água para este parâmetro, o que permitiu avaliar as suas variações nos quatro regimes hidrológicos.

As quatro vazões avaliadas foram: chuvosa, seca, intermediárias chuvosa-seca e seca-chuvosa. A média anual da carga de sólidos em suspensão obtida foi da ordem de 5,13 mg/L. Multiplicando pela descarga líquida afluente média anual (960 m<sup>3</sup>/s) e transformando as unidades, obtém-se uma descarga sólida de aproximadamente 150.000 t/ano de sólidos suspensos (CUNHA, 2010). Esse valor corresponderia a 90% do fluxo total, segundo aproximação de Walling e Fang (2003), o que daria um fluxo total de 167.000 t/ano. Considerando-se que Brito (2008) coletou suas amostras próximas à superfície e que

os sedimentos na coluna d'água se distribuem de tal modo que quanto mais próximo do leito do rio, maior a concentração dos sedimentos, adotou-se um fator 1,3, aproximadamente, para estimar a descarga sólida média anualizada, resultando em 210.000 t/ano, ou seja, 30% maior que o fluxo de sólidos suspensos medidos a partir da superfície.

De acordo com Ecotumucumaque (2010), baseados em dados de Carvalho (2008) e IEPA/ZEE (2008), a região central do Amapá, onde se encontra a bacia do Rio Araguari, há um potencial de produção de sedimentos que varia entre baixo (5 a 70 t/km<sup>2</sup>.ano) e moderado (70 a 200 t/km<sup>2</sup>.ano). Para a área de drenagem a montante de Cachoeira Caldeirão igual a 30,510 km<sup>2</sup>, a descarga sólida de 210.000 t/ano equivale a uma produção de 7.1 t/km<sup>2</sup>.ano, valor que é próximo ao limite inferior estimado por Carvalho (2008) para baixo potencial de produção de sedimentos. A média mundial de produção de sedimento é de 190 t/km<sup>2</sup>.ano em 2004 (PIMENTEL, 2004). Pode-se considerar que essa estimativa é realista para o cenário atual.

O valor inicial utilizado na simulação para a taxa de aumento do transporte de sedimentos foi de 0,7% ano, ao longo do período simulado (200 anos). Em se tratando de uma bacia hidrográfica na qual a maior parte está inserida em áreas de conservação (CUNHA, 2013), é possível afirmar que, com a manutenção da cobertura vegetal atual, essa taxa representa uma boa aproximação inicial.

Babá (2010) fornece a curva Cota x Área x Volume e o volume do reservatório em nível da água máximo ( $NA_{max}$ ). Esses dados estão sendo utilizados para o estudo de viabilidade do empreendimento de aproveitamento hidrelétrico AHECC.

Conforme avaliação das características físicas do reservatório do AHECC, foi definido as do tipo 1, em que os sedimentos estão sempre ou quase sempre submersos.

#### Cenários Simulados

Neste estudo de caso, foram propostos 3 cenários para se avaliar o futuro impacto causado pelo assoreamento no reservatório da UHECC.

**Cenário 1:** corresponde aos valores atuais de descarga líquida, descarga sólida e granulometria dos sedimentos suspensos. Esses valores foram apresentados na tabela 5.

**Cenário 2:** em caso de alterações do uso do solo na bacia hidrográfica, maior quantidade de sedimentos tende a ser carregado para o canal fluvial. Nessas condições, a descarga sólida se altera e com ela a velocidade de assoreamento do reservatório também. Nesse cenário levou-se em conta especificamente que as alterações do uso do solo, nos próximos 50 anos, provocarão aumento de 3% ao ano no transporte de sedimentos, o que parece razoável diante do cenário de construção de uma usina de médio porte e, consequentemente, a migração populacional satélite normalmente encontrada nos empreendimentos amazônicos, como é o caso da UHECN.

Tal cenário é também factível uma vez que ao longo da bacia do Médio Araguari estão também presentes os maiores projetos mineradores do Estado do Amapá. Estes projetos encontram-se principalmente na sub-bacia do Rio Amapari,

seu principal afluente (BRITO, 2008). Em um horizonte de 50 anos, se os órgãos ambientais não realizarem o adequado monitoramento dos parâmetros hidrossedimentométricos e de qualidade da água, e se as exigências da fiscalização e do eficiente licenciamento dos empreendimentos atuais e futuros da bacia forem negligenciados, ou finalmente, se houver alterações significativas no uso e ocupação do solo a montante da UHECC, é possível estimar o início da degradação da bacia e consequente aumento na produção de sedimentos com início da redução da vida útil do reservatório.

**Cenário 3:** considerou-se um caso extremo em que a descarga sólida afluente seria de 6.102.000 t/ano. Esse valor equivale ao limite superior do potencial médio de produção de sedimentos de acordo com Ecotumucumaque (2010). Esse cenário seria talvez o mais esperado caso houvesse alteração significativa do uso e ocupação do solo da bacia (ZEE, 2008). É relevante informar que em várias áreas da bacia hidrográfica do rio Araguari há classificações de vulnerabilidade que variam entre estável e moderadamente estável, mas apresentam localidades extensas com alta vulnerabilidade. E, por estes motivos, a ampliação desordenada da atividade mineradora, desmatamento intensivo da floresta a montante da UHECC, pode ser intensificado pelo aumento da quantidade e intensidade das chuvas, como consequência de alterações climáticas e maior frequência de eventos extremos nesta bacia (CUNHA et al., 2014).

Deste modo, manteve-se, neste cenário, a taxa de crescimento anual da produção de sedimentos em 3% ao ano, tal qual o cenário 2.

### 3. Resultados e Discussão

A partir do software SEDIMENT<sup>®</sup>, foi estimado o nível de assoreamento do reservatório da futura UHE Cachoeira Caldeirão para os 3 cenários propostos (Figura 5).

Obteve-se a eficiência de retenção sólida em cada um dos cenários ao longo do tempo (figura 6). Em todos os casos, houve pouca variação do peso específico aparente dos sedimentos depositados, a qual indicou valores de 1,536 a 1,543 t/m<sup>3</sup>, devido às características físicas do reservatório, bem como sua constituição granulométrica.

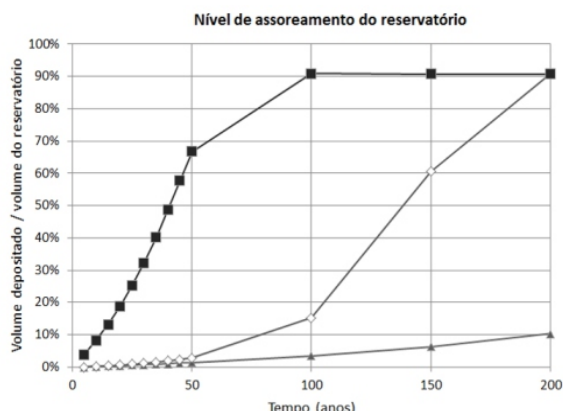
O cenário 1 representa os níveis atuais de produção de sedimentos e que propõe apenas uma pequena alteração desses níveis ao longo dos anos, com o uso da bacia focado na conservação das florestas e uso e ocupação sustentáveis (DIAS, 2012).

Os modelos revelaram que, para este caso, observa-se que nas próximas 5 décadas apenas 1,5% do volume do reservatório estaria comprometido com o processo de hidrossedimentação. E em 200 anos, o volume de sólidos depositados seria equivalente a apenas cerca de 10% do volume do reservatório. É um ótimo cenário, caso sejam mantidas as principais características de uso e ocupação do solo na zona de montante ao futuro empreendimento. E este panorama mostra a importância das florestas das UCs para a conservação dos empreendimentos hidrelétricos (NGUYENA et al., 2013).

No cenário 2, que sugere alterações mais impactantes na bacia hidrográfica (ECOTUMUCUMAQUE, 2009), o nível de



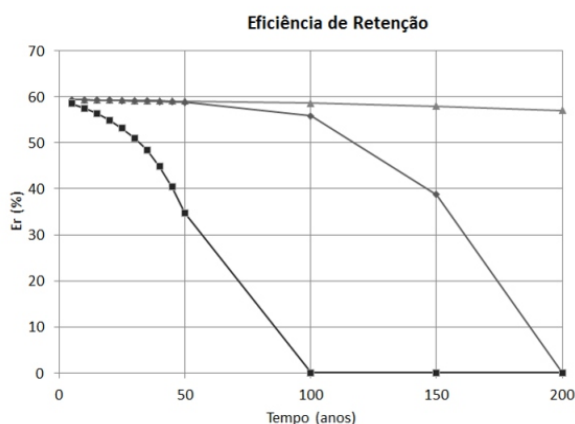
assoreamento em 50 anos seria de praticamente o dobro do volume obtido no cenário 1 (2,9% contra 1,5%). Em um horizonte temporal mais distante, entretanto, o volume depositado equivaleria a valores significativos do volume total do reservatório. Ou seja, em 100 anos, 15,3%; em 150 anos, 60,6%; e em 200 anos, 90,9%.



**Figura 5.** Nível de assoreamento do reservatório nos 3 cenários propostos.

No cenário 3 a quantidade de sedimentos depositados no reservatório crescerá de modo significativo em um espaço de tempo relativamente curto em relação a um empreendimento hidrelétrico. Em 50 anos quase 70% do volume do reservatório estaria ocupado pela carga sólida depositada. Esse cenário seria esperado caso alterações agressivas importantes ocorressem na bacia do Rio Araguari, o que provavelmente aumentaria a taxa de erosão na bacia. Um exemplo seria uma potencialmente rápida ocupação do território nas áreas próximas e a montante dos empreendimentos, com impactos sobre as áreas de amortecimento das Unidades de Conservação (DIAS, 2012).

O comportamento das curvas de eficiência de retenção de sedimentos é inverso às curvas de assoreamento. Isso é o esperado uma vez que a eficiência de retenção de um reservatório e o volume de sólidos depositados tem relação inversa. A Figura 6 mostra a eficiência de retenção para os 3 cenários estudados. Isto é, quanto mais assoreado for o reservatório, menor é sua capacidade de reter a nova carga de sólidos. Isso porque esta carga, principalmente a que se deposita mais próxima da superfície da água, é mais facilmente erodida ("arrastada") deste depósito pelo efeito hidrodinâmico do estreitamento da coluna d'água transversal ao fluxo (CUNHA et al., 2013).



**Figura 6.** Valores de eficiência de retenção do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão ao longo do tempo para os 3 cenários estudados.

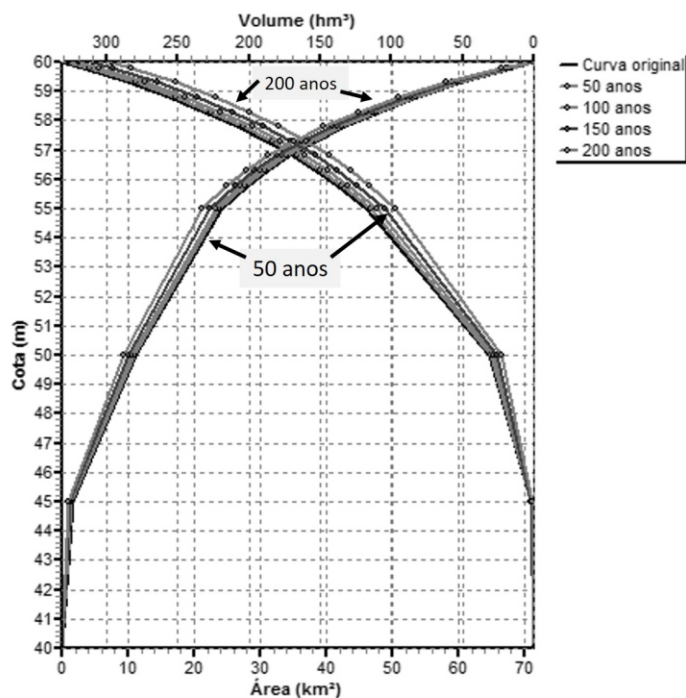
Um segundo problema causado pela diminuição da eficiência de retenção é que os sedimentos que passam pela barragem (vertedores e turbinas) podem provocar desgastes nas estruturas, comportas, turbinas e outras peças importantes da usina hidrelétrica. Isso também gera o aumento de custos de manutenção e operação. Além disso, podem ocorrer danos ecológicos ao ecossistema artificial em equilíbrio (cadeia alimentar) (BRITO, 2008; CUNHA et al, 2013b). Normalmente tais situações podem também provocar danos materiais e comprometer a geração de energia elétrica, elevando a frequência de procedimentos de manutenção ou ações de controle ambiental, por exemplo.

Com uso do software DPOSIT<sup>®</sup> calculou-se as novas curvas cota x área x volume para os 3 cenários. Em cada cenário, foram simuladas as novas curvas para 50, 100, 150 e 200 anos. As Figuras 7, 8 e 9 mostram esses resultados.

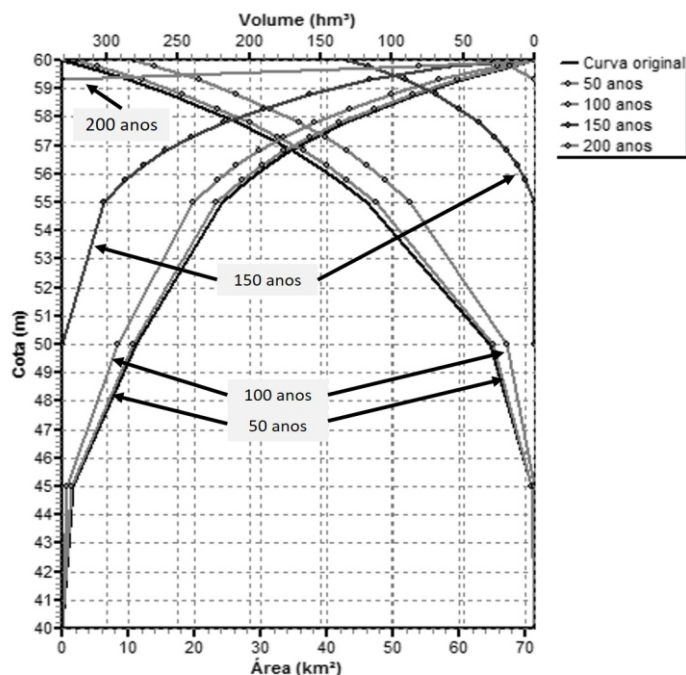
No cenário 1, observa-se que em 200 anos de operação há pouca alteração na relação cota x volume e cota x área. Esse resultado é esperado uma vez que, neste caso, supôs-se a manutenção da cobertura vegetal nas áreas de preservação a montante da barragem. Como o potencial de produção de sedimentos da barragem é atualmente baixo, ao longo do tempo, também pouca alteração tende a ocorrer no reservatório, resultando no que é apresentado nas Figuras 4 e 5.

Para o cenário 2 observa-se que a partir de 100 anos, o nível de assoreamento no reservatório apresentaria influência importante na curva cota x área x volume. Tanto que já se percebe um significativo deslocamento (distanciamento) das respectivas curvas.

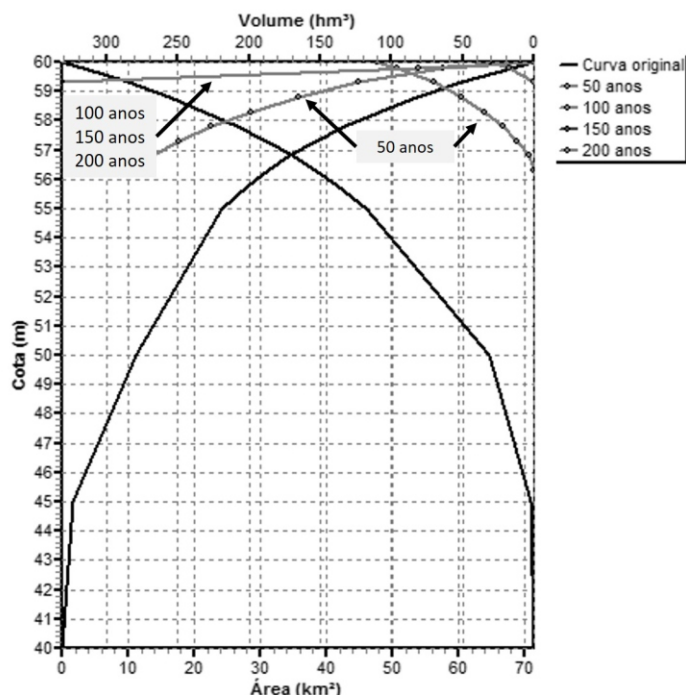
No cenário 3, observa-se na figura 9 que em 50 anos o reservatório apresentaria mudanças significativas e drásticas na relação cota x área x volume. A velocidade do assoreamento neste cenário comprometeria de maneira significativa a vida útil do reservatório, causando potencialmente resultados desastrosos para o ambiente em que ele se encontra.



**Figura 7.** Curva Cota x Área x Volume para o cenário 1.



**Figura 8.** Curva Cota x Área x Volume para o cenário 2.



**Figura 9.** Curva Cota x Área x Volume para o cenário 3.

Com base nestes cenários é possível especular uma série de análises. Por exemplo, a preservação dos níveis atuais de uso do solo e das taxas de erosão ao longo do Rio Araguari e de seus afluentes é necessária para que o aproveitamento hidrelétrico ocorra com o menor impacto possível para os ecossistemas aquáticos e vice-versa.

Segundo Alix-Garcia et al., (2014), desde 2000 a 2010, o planeta perdeu florestas nativas proporcionais ao território da Costa Rica causado pelo crescimento populacional. Esta é uma escala considerável. Assim, o rápido processo de desflorestamento tem modificado rapidamente a composição física e química dos biomas e da atmosfera, bem como o nível de equilíbrio da biodiversidade. A presença de vegetação chave é, portanto

muito útil para a manutenção das funções da bacia hidrográfica e prevenindo a fragmentação do território (floresta) e o seu assoreamento (NGUYENA et al., 2014). Nas bacias hidrográficas de todo o mundo tem ocorrido uma espécie de "boom" de projetos de desenvolvimento locais que exigem políticas e instrumentos para prevenir o mau uso e ocupação do solo e o encorajamento do crescimento de áreas florestadas no seu entorno.

Um fato adverso ao problema da hidrossedimentação, e que deve ser efetivamente considerado, é o remanso da UHECC para zona de montante (ondas que se refletirão na barragem em direção contrária ao sentido normal do fluxo). Seus efeitos estimados serão sentidos até um ponto próximo da cidade de Porto Grande (ECOTUMUCUMAQUE, 2009). Por estes motivos as elevações de fundo, causada por assoreamentos diversos, podem influir na dinâmica do nível da água que podem afetar este município, provocando inclusive inundações, como os que ocorreram nos casos extremos em abril de 2012 (CUNHA et al., 2014). Este seria um potencial caso extremo previsto para o cenário 3, por exemplo.

Por esta razão o aumento descontrolado da carga de sólidos transportados pelo rio tende a intensificar efeitos antes pouco danosos à população (efeito sinérgico). O aumento do volume de sedimentos provoca, portanto, o aumento da área alagada a montante do reservatório, com consequências que extrapolam apenas a vida útil do reservatório. A interação física entre o leito do rio e as margens se modifica significativamente, podendo intensificar também a troca de nutrientes entre ambos.

Tal fato pode também resultar em mudanças das características da mata ciliar e na dinâmica ecológica entre os dois ambientes (água e terra) (CARVALHO, 2008). O aumento da concentração de nutrientes no rio devido a maior carga de sedimentos transportados pode resultar em efeitos negativos como o favorecimento da eutrofização (CUNHA et al., 2013b), comprometendo a composição e riqueza de algas e a qualidade da água e seus aspectos sanitários de modo geral. Estes resultados poderiam até mesmo inviabilizar ecologicamente as interações aquáticas no novo reservatório e seus múltiplos usos. E se estas consequências ocorrerem seriam indesejáveis porque apresentar-se-iam como não conformidades ambientais do reservatório.

Um aspecto final relevante neste contexto é que, de acordo com ZEE/IEPA (2008), a avaliação da vulnerabilidade natural à erosão do solo constitui um indicador da capacidade de sustentação natural dos ecossistemas e, portanto, podem ser vinculados com os processos hidrossedimentométricos e os empreendimentos hidrelétricos, úteis como um instrumento de previsão a possíveis riscos que impliquem em transformações sérias às condições primitivas nos territórios.

#### 4. Conclusão

Este estudo apresentou três cenários ambientais simulados e relacionados com processos hidrossedimentométricos no trecho do Médio Rio Araguari. Este trecho está sendo afetado pela construção da barragem da Usina Hidrelétrica Cachoeira Caldeirão. Para tanto, foi feito uso de modelos



matemáticos consagrados (empíricos e semi-empíricos) obtidos da literatura da área, com o objetivo de prever os níveis de assoreamento e a vida útil do reservatório durante e após a construção do reservatório.

O modelo de Borland e Miller foi usado para elaborar um diagnóstico atual e futuro hidrossedimentométrico da bacia. Porém, deve-se levar em conta as limitações de dados de entrada do modelo, como a ausência de um sistema de monitoramento hidrossedimentométrico.

Os cenários foram concebidos segundo um modelo empírico desenvolvido com base de dados de 30 reservatórios americanos. De forma similar, a curva de Brune, usada para estimar a eficiência da retenção no reservatório foi com informações similares de represas americanas durante sua construção. Isso, portanto, não invalida os resultados aqui apresentados, uma vez que tais modelos têm sido amplamente usados e com sucesso em outras situações, como a UHE de Itaipu e Tucuruí. Entretanto, os resultados aqui apresentados devem apenas representar um passo inicial no estudo hidrossedimentométrico da UHECC, como uma referência básica para outros estudos sobre o tema.

Deste modo, as principais conclusões específicas sobre os cenários foram:

No **cenário 1** foi observado que a manutenção das condições ambientais das florestas e áreas de conservação (uso e ocupação do solo) favoreceriam a manutenção dos baixos níveis de sólidos ou da carga sedimentar no rio, com poucos impactos na vida útil da barragem. A vida útil do reservatório seria a mais longa possível.

Nos **cenários 2 e 3**, que representam, respectivamente, simulações das alterações significativas na produção de sedimentos da bacia do Rio Araguari, mostraram que, caso venham a ocorrer, a vida útil do futuro aproveitamento hidrelétrico seria comprometida. Isto é, tenderiam a diminuir rápida ou drasticamente sua capacidade volumétrica.

Especificamente no **cenário 3**, o mais radical dos três, os impactos aconteceriam mais rapidamente, e seriam previstas intensas modificações no potencial de erosão da bacia, provocados por diversos fatores agressivos. Tendo entre as principais causas, mudanças drásticas do uso e ocupação do solo, como aumento dos níveis de atividade mineradora, urbanização ao longo do canal principal do rio Araguari, desflorestamento, de matas ciliares, alguns já existentes e intensos, normalmente consideradas como os mais influentes.

Uma das principais recomendações desta investigação sugere a implementação de um sistema permanente de monitoramento hidrossedimentométrico em consonância com outros parâmetros da qualidade da água, além dos hidrometeorológicos, os quais seriam essenciais para o acompanhamento dos impactos atuais e futuros na bacia, vez que a intensa precipitação e o mau uso da terra acarretam aumento da erosão na bacia.

Este trabalho, apesar de apresentar um caráter investigativo, tem uma dimensão importante para os usuários da bacia hidrográfica, pois este tipo de análise mostra que no Amapá praticamente inexistem sistemas de monitoramento hidrossedimentométricos para os barramentos. Se os dados existem, não estão facilmente disponíveis. E, se este for o caso, ainda há riscos consideráveis de ocorrência de erros de

projetos, pois o monitoramento observado tem sido apenas a *posteriori*, apresentando-se como um potencial problema operacional, pois não garante boa qualidade de projetos futuros nesta área. Portanto, esta análise pode ser considerada como um estudo técnico básico. Mas serve como alerta importante para ecólogos, engenheiros e ambientalistas interessados no tema, mas, principalmente, aos usuários desta bacia.

As tomadas de decisão com base neste tipo de estudo seriam mais bem embasadas para as práticas atuais e futuras de conservação e aproveitamento do reservatório. Assim, alguns cuidados em relação ao uso e ocupação da bacia poderiam reduzir os impactos ambientais, prevenindo-a de consequências indesejadas, haja vista que nesta área temática os efeitos sinérgicos são evidentes, além de apresentar um caráter complexo do ponto de vista socioambiental no horizonte temporal de algumas décadas.

## 5. Agradecimentos

Este artigo foi apoiado financeiramente pelo projeto CNPQ (Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), process number Process: 475614/2012-7 sob o título "Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água no Estuário do Baixo Rio Araguari - AP".

## 5. Referências Bibliográficas

- ALIX-GARCIA, J. and WOLFF, H. Payment for Ecosystem Services from Forests. **Annual Review of Resource Economics**. 6:361–80. 2014.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª ed. Brasília. 236 p., 2008.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/SelecaoDoRioPasso2.asp>>. Acesso em junho de 2015.
- ANEEL/PCE Consultoria/Abrace. Jornal "O Globo", edição de 29/11/2009.
- BABÁ, L. J. N. **Estudos de Viabilidade do AHE Cachoeira Caldeirão - Dados para Elaboração dos Estudos Energético-Econômicos**; Memória Técnica, 2010.
- BÁRBARA, V.F., CUNHA, A.C., RODRIGUES, A.S. de L., SIQUEIRA, E.Q., Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari/AP. **Revista Biociências**, v. 16, p. 57-72, 2010.
- BORLAND, W. M.; MILLER, C. R. Distribution of Sediment in Large Reservoirs. **Transactions, ASCE**, v. 125, 1960.
- BRAGA, A., **Sediment - Cálculo de Assoreamento de Reservatórios - Manual do usuário (vs.1.1)**, sem data.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 1997. p. 1-8.
- BRITO, D. C. **Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2Kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Araguari - AP**, 2008, 151f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP, 2008.
- BRUNE, G. M. Trap Efficiency of Reservoirs. **Trans. Am. Geophysical Union**, v. 34, n. 3, p. 407-418, 1953.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**, 2ª Ed. Revisada e Ampliada. Editora Interciência, 559 p. 2008.
- CHURCHILL, M. A. **Discussion of "Analysis and Use of Reservoir Sedimentation Data"**, by L. C. Gottschalk, pp. 139-140, Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conf., Denver, 1948.
- CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B.; CUNHA, H. F. A. (Orgs). **Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá**. Macapá-AP. IEPA. 216p. 2010.

- CUNHA, A. C., Medidas granulométricas de hidrossedimentos no Rio Araguari. **Comunicação Pessoal**, Macapá, Novembro, 2010.
- CUNHA, A. C. Revisão descritiva sobre ecossistemas aquáticos na perspectiva da modelagem da qualidade da água. **Biota Amazônia**, v. 3, p. 124-143, 2013.
- CUNHA, A. C.; PINHEIRO, L. A. R.; CUNHA, H. F. A. Modelagem e simulação do escoamento e dispersão sazonais de agentes passivos no rio Araguari: Cenários para o AHE Ferreira Gomes I - Amapá/Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 57-85, 2013a.
- CUNHA, E. D. S.; CUNHA, A. C.; SILVEIRA JR., A. M.; FAUSTINO, S. M. M. Phytoplankton of two rivers in the eastern Amazon: characterization of biodiversity and new occurrences. **Acta Botanica Brasilica** (Impresso), v. 27, p. 364-377, 2013b.
- DAI, S. B.; YANG, S. L.; CAI, A. M. Impacts of dams on the sediment flux of the Pearl River, southern China, **Catena**, v. 76, p. 36-43, 2008.
- DIAS, T. C. A. C. **Unidades de conservação brasileiras: investimentos, custos de manejo e potencialidades econômicas**. Tese (Doutorado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá. 2013.
- ECOTUMUCUMAQUE, **EIA - Estudo de Impacto Ambiental do Empreendimento Avaliação Hidroelétrico Ferreira Gomes: Diagnóstico Meio Físico**, 2010.
- ELETRONORTE - CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A., **Estudos de Inventário Hidrelétrico - Bacia Hidrográfica do Rio Araguari - Estado do Amapá - Relatório Final**, 1999.
- ELETRONORTE - CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A. Disponível em: < <http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/amapa/>>. Acesso em: 12 jun. 2016.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). Visão Geral sobre Hidroenergia no Brasil e Descrição dos Métodos - Geração Energia Hidráulica e Áreas de Conservação: Fonte: <http://uc.socioambiental.org/press%C3%B5es/hidrel%C3%A9tricas>. Acesso: maio de 2015.
- INSTITUTO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DO ESTADO DO AMAPÁ. **Macrodiagnóstico do Estado do Amapá - Primeira Aproximação** - 3a. Edição Revisada e Ampliada. Equipe do ZEE/IEPA. Governo do Estado do Amapá. Macapá 2008.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 406p. 2007.
- JUNK, W. J.; MELLO, J. A. S. **Impactos de hidrelétricas na bacia amazônica brasileira**. Transcrição da Obra: Homem e Natureza na Amazônia. Simpósio internacional e interdisciplinar (Blaubeuren, 1986), editado por Gerd Kohlhepp e Achim Schrader. Associação Alemã de Pesquisas sobre a América Latina em colaboração com Max-Planck-Institut für Limnologie (Plön) e Forschungsschwerpunkt lateinamerika, Geographisches Institut, Universität Tübingen. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 8. p. 126-148, 1987.
- LARA, J. M.; PEMBERTON, E. L. Initial Unit Weight of Deposited Sediments, Federal Interagency Sedimentation Conference, 1963, Miscellaneous Publication, **Agriculture Research Service**, n. 970, p. 818-845, 1965.
- NGUYENA, T. T.; PHAMB, V. D.; TENHUNENC, JOHN. Linking regional land use and payments for forest hydrological services: A case study of Hoa Binh Reservoir in Vietnam. **Land Use Policy**, v. 33, p. 130-140, 2013.
- MILLER, C. R. **Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations**, Bureau of Reclamation, Denver, CO, 1953.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill Book Co., New York, 2010.
- PETTS, G. E. **Impounded rivers, perspectives for ecological management**, New York: Wiley, 1984.
- PIMENTEL, V. C. R. **Alternativas de Solução para os Impactos Físicos de Barragens**, 2004, 416f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- PHILLIPS, J. D.; SLATTERYB, M. C.; MUSSELMAN, Z. A. Dam to delta sediment inputs and storage in the lower Trinity River, Texas, **Geomorphology**, v. 62, p. 17-34, 2004.
- SEMA. **Bacias Hidrográficas - Estado do Amapá**, Coordenadoria de Recursos Ambientais - Divisão de Geoprocessamento, 2004.
- STRAND, R. I. **Design of small dams**, Bureau of Reclamation. Washington, DC, 1987.
- VÖRÖSMARTY, C. J., MEYBECK, M., FEKETE, B., SHARMAD, K., GREENA, P., SYVITSKIE, J.P.M., 3, **Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments**. *Global and Planetary Change*, vol. 39, p. 169-190, 2003.
- WALLING, D. E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers, **Global and Planetary Change**, v. 39, p. 111-126, 2003.
- WAHRHAFTIG, C.; CURRY, R. R. **Geologic implications of sediment discharge records from the northern Coast Ranges, California**. In: Man's effect on Californian watersheds, Part III. Report of the Inst. of Ecology, Univ. of California, Davis Calif.:35-58, 1967.
- WCD. World Commission of Dam. Dams, ecosystem functions and environmental restoration. versão final: Novembro, 2000.